

№ 746

МИСиС

Б.К. Опара

Инженерная защита металлопродукции, конструкций и сооружений

Электрохимическая защита
и рациональное конструирование

Курс лекций

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

№ 746

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ
И СПЛАВОВ

МИСиС



Кафедра защиты металлов и технологии поверхности

Б.К. Опара

Инженерная защита металлопродукции, конструкций и сооружений

Электрохимическая защита
и рациональное конструирование

Курс лекций

Допущено учебно-методическим объединением
по образованию в области металлургии в качестве
учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по специальности
Физико-химия процессов и материалов

УДК 620.197
О-60

Рецензент
д-р техн. наук, проф. *С.Н. Падерин*

Опара Б.К.

О-60 Инженерная защита металлопродукции, конструкций и сооружений. Электрохимическая защита и рациональное конструирование: Курс лекций. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2008. – 126 с.

Курс посвящен описанию электрохимических методов защиты конструкций от коррозии: протекторной защиты, катодной защиты с использованием внешнего источника тока, электродренажной защиты от коррозии блуждающими токами и анодной защиты технологического оборудования, изготовленного из сплавов, склонных к пассивированию. Рассмотрены также принципы рационального конструирования технологической аппаратуры, обеспечивающие повышение коррозионной стойкости оборудования при самых незначительных затратах.

Предназначен для студентов специализации «Инженерная защита металлопродукции, конструкций и сооружений» специальности 150701 «Физико-химия процессов и материалов». Может быть использован студентами других специальностей, обучающихся по направлениям «Металлургия» и «Физическое материаловедение».

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
1. Катодная защита внешним током	7
1.1. Принцип и эффективность метода	8
1.2. Основные параметры катодной защиты	9
1.2.1. Минимальный защитный потенциал	9
1.2.2. Максимальный потенциал	12
1.2.3. Минимальная защитная плотность тока	12
1.3. Методы расчета катодной защиты	13
1.3.1. Графический расчет катодной защиты	13
1.3.2. Инженерный расчет катодной защиты	17
1.3.3. Недостатки изложенных методов расчета катодной защиты	24
1.3.4. Зависимость параметров защиты от расстояния между трубопроводом и АЗ	25
1.3.5. Зависимость параметров защиты от поляризации трубопровода при наложении защитного тока	27
1.3.6. Изменение удельного сопротивления грунта по длине трубопровода	29
1.4. Типы, расположение и расчет анодных заземлений	30
1.4.1. Материал анодных заземлений	30
1.4.2. Типы и расположение анодных заземлений	32
1.4.3. Расчет анодного заземления	34
1.4.4. Рациональный выбор анодного заземления	39
1.4.5. Выбор источника тока катодной защиты	41
1.5. Катодная защита заводской аппаратуры и ее расчет	42
1.6. Примеры расчета катодной защиты	43
2. Протекторная защита	52
2.1. Сущность метода и его применение для защиты различного оборудования	52
2.2. Материал протекторов, сфера их действия, расположение, размеры, методы крепления	55
2.2.1. Материал протекторов	55
2.2.2. Сфера (радиус) действия протекторов	58
2.2.3. Расположение и размеры протекторов	58
2.2.4. Методы крепления протекторов	62
2.3. Основы проектирования протекторной защиты	63

2.4. Пример расчета протекторной защиты подземного трубопровода.....	66
3. Анодная защита	70
3.1. Принцип и эффективность анодной защиты	70
3.2. Основные электрохимические параметры анодной защиты ...	71
3.2.1. Область пассивного состояния.....	71
3.2.2. Плотность тока поддержания пассивного состояния.....	72
3.2.3. Плотность критического тока пассивации	72
3.2.4. Последствие анодной защиты	74
3.3. Аналитический расчет анодной защиты	74
3.3.1. Расчет анодной защиты непротяженных конструкций (реакторов, хранилищ)	74
3.3.2. Расчет анодной защиты протяженных конструкций (холодильников, теплообменников трубчатого типа и др.)	77
4. Защита от коррозии блуждающими токами.....	83
4.1. Источники блуждающих токов	83
4.2. Оценка опасности коррозии блуждающими токами.....	85
4.3. Методы защиты от коррозии блуждающими токами	87
4.4. Расчет параметров электродренажной защиты	92
4.5. Расчет поляризованных протекторов	94
5. Технико-экономические показатели электрохимической защиты.....	96
5.1. Расчет себестоимости, эксплуатационных расходов и их изменения в результате осуществления защиты	96
5.2. Сопоставление стоимостных показателей и определение срока окупаемости.....	97
5.3. Общая оценка эффективности и выбор лучшего варианта защиты	98
5.4. Экономические аспекты анодной защиты	98
6. Защита от коррозии на стадии проектирования и сборки технологического оборудования.....	100
6.1. Влияние элементов конструкций на коррозионные процессы.....	100
6.1.1. Макронеоднородность металлической поверхности	100
6.1.2. Узкие зазоры	102
6.1.3. Труднодоступные и трудноосушаемые участки, застойные зоны	104
6.1.4. Локализованное поступление среды, ее физико-химическая и физическая неоднородность	105

6.1.5. Совместное коррозионное и механическое воздействие агрессивной среды.....	106
6.1.6. Неравномерное распределение теплового потока.....	107
6.2. Основные принципы рационального конструирования.....	107
6.2.1. Отсутствие неблагоприятных контактов и их обезвреживание.....	108
6.2.2. Учет и ослабление механических воздействий	110
6.2.3. Устранение труднодоступных участков и застойных зон.....	112
6.2.4. Сведение к минимуму числа зазоров.....	116
6.2.5. Использование предохранительных устройств	118
7. Качественная технология изготовления аппаратуры.....	119
7.1. Технологические особенности заклепочных соединений	119
7.2. Технологические особенности сварных соединений	121
Библиографический список.....	125

ВВЕДЕНИЕ

В курсе лекций рассматриваются широко используемые в промышленности методы электрохимической защиты от коррозии технологического оборудования, конструкций и сооружений. К ним относятся: протекторная и катодная защита с использованием внешнего источника тока, анодная защита различного технологического оборудования, изготовленного из способных пассивироваться сплавов, электродренажная защита от коррозии блуждающими токами подземных сооружений и технологического оборудования электрохимических и других производств.

Изложению основного материала предшествует краткое описание механизма соответствующего коррозионного процесса и теоретическое обоснование возможности использования соответствующего метода защиты. Затем излагаются методы инженерных расчетов параметров каждого метода защиты и приводится соответствующий справочный материал, который необходим студентам при выполнении курсового проекта.

В главах, посвященных рациональному конструированию, вначале рассматривается влияние отдельных элементов конструкции на коррозионные процессы, а затем на этой основе формулируются основные принципы рационального конструирования и технологии изготовления технологического оборудования и аппаратуры.

Курс может быть использован студентами других специальностей, слушающих общеинженерный курс «Коррозия и защита металлов» и желающих углубить свои знания при изучении соответствующих разделов курса.

1. КАТОДНАЯ ЗАЩИТА ВНЕШНИМ ТОКОМ

Катодная защита внешним током осуществляется подсоединением защищаемой конструкции к отрицательному полюсу источника тока, к положительному полюсу которого присоединен дополнительный, анодно поляризуемый электрод (рис. 1.1).

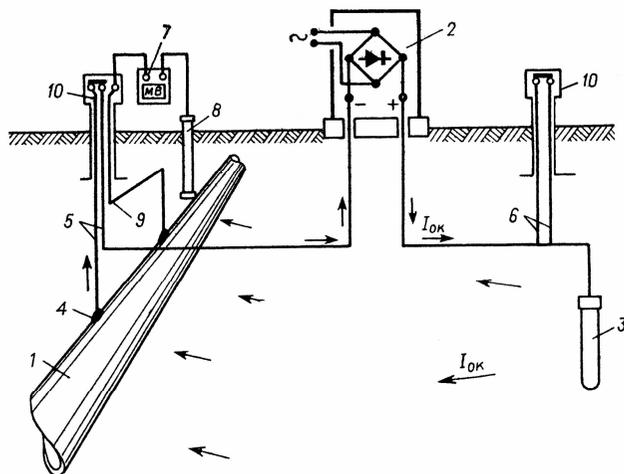


Рис. 1.1. Схема катодной защиты трубопровода внешним током:
1 – защищаемый трубопровод; 2 – источник постоянного тока (станция катодной защиты); 3 – анодное заземление; 4 – точка дренажа; 5 – катодный провод; 6 – анодный провод; 7 – прибор для измерения потенциала защищаемой конструкции; 8 – медно-сульфатный электрод сравнения; 9 – потенциальный ввод;
10 – контрольные выводы

Катодная защита внешним током широко применяется:

- 1) как дополнительный (к изолирующему покрытию), а иногда и как самостоятельный метод защиты от коррозии подземных сооружений (трубопроводов, резервуаров и др.);
- 2) как метод защиты корпусов морских и речных судов, металлических конструкций различных береговых и подводных сооружений;
- 3) для предотвращения коррозии заводской аппаратуры (конденсаторов, холодильников и др.).

1.1. Принцип и эффективность метода

Принципиальная схема катодной защиты приведена на рис. 1.1, а электрическая – на рис. 1.2. Источником напряжения, необходимого для катодной поляризации защищаемой конструкции, может быть любой источник постоянного тока (аккумулятор, выпрямитель и др.).

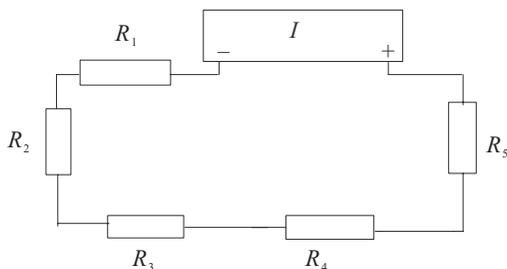


Рис. 1.2. Электрическая схема катодной защиты внешним током:

R_1 – сопротивление соединительного (катодного) провода;

R_2 – сопротивление защищаемой конструкции (трубопровода);

R_3 – переходное сопротивление между защищаемой конструкцией и почвой; R_4 – сопротивление анодного заземления; R_5 – сопротивление

соединительного (анодного) провода

От отрицательного полюса источника постоянного напряжения ток по соединительному катодному проводу с сопротивлением R_1 попадает в точку дренажа (см. рис. 1.1) на защищаемую конструкцию, сопротивление которой R_2 . Величина сопротивления R_3 , являющегося переходным между конструкцией и коррозионной средой, зависит от состояния защитного изолирующего покрытия конструкции. Сопротивление коррозионной среды, например почвы, между конструкцией и вспомогательным электродом (анодным заземлением) учитывают, если переходное сопротивление R_3 очень мало, например, когда сильно разрушено или отсутствует изолирующее покрытие на защищаемой конструкции. В остальных случаях величиной сопротивления коррозионной среды пренебрегают. Из коррозионной среды (почвы) ток попадает на вспомогательный электрод (анодное заземление), сопротивление которого R_4 состоит из переходного сопротивления коррозионная среда – вспомогательный электрод (анодное заземление) и сопротивления материала, из которого он изготовлен, и по анодному проводу с сопротивлением R_5 возвращается к положительному полюсу источнику тока. При расчетах со-

противление проводов R_1 и R_2 объединяют, обозначая их общее сопротивление $R_{пр}$, а в сопротивление R_3 включают R_2 .

Эффективность катодной защиты может быть оценена величинами защитного эффекта Z и коэффициентом защитного действия K_3 :

$$Z = \frac{\Delta m_0 - \Delta m_1}{\Delta m_0} 100; \quad (1.1)$$

$$K_3 = \frac{\Delta m_0 - \Delta m_1}{i_k}, \quad (1.2)$$

где Δm_0 – потеря массы металла в коррозионной среде без катодной защиты, $г/м^2$;

Δm_1 – потеря массы металла в коррозионной среде при катодной защите, $г/м^2$;

i_k – плотность катодного тока, $А/м^2$.

Катодная поляризация конструкции часто сопровождается образованием на ее поверхности осадка труднорастворимых гидроксидов, а также дополнительным смещением потенциала конструкции в отрицательную сторону за счет увеличения концентрационной поляризации по кислороду, что приводит к увеличению эффективности катодной защиты.

1.2. Основные параметры катодной защиты

Основными параметрами, характеризующими наиболее эффективное применение катодной защиты, являются:

- минимальный защитный потенциал E_3 ;
- максимальный потенциал E_{\max} ,
- минимальная защитная плотность тока i_3 .

1.2.1. Минимальный защитный потенциал

Минимальным защитным потенциалом является потенциал, при котором прекращается коррозионный процесс. Теоретическое значение этого потенциала рассчитывают, используя теорию многоэлектродных систем. Из этой теории следует, что для прекращения коррозии потенциал конструкции необходимо сместить до потенциала

наиболее отрицательной анодной составляющей ее поверхности, т.е. полная защита конструкции возможна при выполнении условия $E_x = (E_a)_{\text{обр}}$. Для прекращения коррозии стальной конструкции ее потенциал должен быть равен обратимому потенциалу железа в данном электролите, который может быть рассчитан по уравнению

$$E_z = (E_{\text{Fe}})_{\text{обр}} = E_{\text{Fe}}^0 + \frac{RT}{2F} \ln a_{\text{Fe}^{2+}}, \quad (1.3)$$

где E_{Fe}^0 – стандартный потенциал железа;

R – универсальная газовая постоянная;

T – абсолютная температура;

F – число Фарадея;

$a_{\text{Fe}^{2+}}$ – активность ионов железа в приэлектродном слое электролита.

Так как при $\text{pH} > 5,5$ взаимодействие ионов железа с гидроксильными ионами приводит к образованию гидроксида железа, то для определения активности ионов железа в (1.3) можно воспользоваться произведением растворимости $\text{Fe}(\text{OH})_2$. В этом случае уравнение (1.3) примет вид

$$\begin{aligned} E_z = (E_{\text{Fe}})_{\text{обр}} &= E_{\text{Fe}}^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{PP_{\text{Fe}(\text{OH})_2}}{a_{\text{OH}^-}^2} = E_{\text{Fe}}^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{PP_{\text{Fe}(\text{OH})_2} a_{\text{H}^+}^2}{K_{\text{B}}^2} = \\ &= E_{\text{Fe}}^0 + \frac{RT}{2F} (\ln \frac{PP_{\text{Fe}(\text{OH})_2}}{K_{\text{B}}^2} - 2\text{pH}), \end{aligned} \quad (1.4)$$

где $PP_{\text{Fe}(\text{OH})_2} = a_{\text{Fe}^{2+}} a_{\text{OH}^-}^2$ – произведение растворимости $\text{Fe}(\text{OH})_2$, равное $1,65 \cdot 10^{-15}$;

$K_{\text{B}} = a_{\text{H}^+} a_{\text{OH}^-}$ – ионное произведение воды, равное $1,008 \cdot 10^{-14}$;

$\text{pH} = -\log a_{\text{H}^+}$ – водородный показатель в приэлектродном слое;

a_{H^+} и a_{OH^-} – активность гидроксильных и водородных ионов в приэлектродном слое.

Подставляя в (1.4) численные значения входящих в него величин и переходя к десятичным логарифмам, получим

$$E_3 = (E_{\text{Fe}})_{\text{обр}} = -0,440 + 0,0296 \left(\log \frac{1,65 \cdot 10^{-15}}{(1,008 \cdot 10^{-14})^2} - 2\text{pH} \right) = - (0,050 + 0,0592\text{pH}). \quad (1.5)$$

Так как активность водородных ионов в приэлектродном слое электролита при коррозии железа находится в интервале pH от 8,3 до 9,3, а почва является неперемешиваемым электролитом, то теоретическое значение защитного потенциала стали в почве колеблется в пределах от $-0,541$ до $-0,618$ В, составляя в среднем $-0,58$ В по отношению к стандартному водородному электроду.

В некоторых случаях на поверхности защищаемых изделий образуется осадок гидроксидов металлов, ионы которых в достаточном количестве содержатся в электролите, и обратимый потенциал железа фактически определяется их активностью. Так, при катодной защите в морской воде на поверхности стальных конструкций образуется осадок $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Активность ионов железа в приэлектродном слое можно определить по уравнению

$$a_{\text{Fe}^{2+}} = a_{\text{Mg}^{2+}} \frac{PP_{\text{Fe}(\text{OH})_2}}{PP_{\text{Mg}(\text{OH})_2}} = 0,3 \cdot 10^{-3} a_{\text{Mg}^{2+}}, \quad (1.6)$$

а уравнение для определения защитного потенциала для стали примет вид

$$E_3 = (E_{\text{Fe}})_{\text{обр}} = E_{\text{Fe}}^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(a_{\text{Mg}^{2+}} \frac{PP_{\text{Fe}(\text{OH})_2}}{PP_{\text{Mg}(\text{OH})_2}} \right) \quad (1.7)$$

После подстановки численных значений входящих в (1.7) величин и перехода к десятичным логарифмам получим

$$E_3 = (E_{\text{Fe}})_{\text{обр}} = -0,440 + 0,0296 \log a_{\text{Mg}^{2+}} \quad (1.8)$$

Значение катодной поляризации, необходимой для полной защиты конструкции, равно разности между защитным потенциалом и начальным (до катодной поляризации) потенциалом металла в данном электролите. Применительно к почвам, где стационарный (на-